

# 连续波氟化氢和氟化氙 化学激光器

(俄罗斯)费德洛夫 著

袁圣付 马建光 译  
华卫红 陈元兴

国防科技大学出版社

·长沙·

---

---

## 译者的话

燃烧驱动连续波氟化氢和氟化氙化学激光器是传统的高能化学激光器光源之一，到目前为止，仍然保持连续输出功率水平的最高纪录。氟化氙激光器输出的多谱线位于大气窗口的中波红外波段，紧凑型中、低功率的氟化氢和氟化氙激光器应用研究尤其具有广阔的前景。

本书原著是俄罗斯学者在总结本国长期研究成果的基础上编写的，该书从化学激光器的基本工作原理出发，详细探讨了氟化氢和氟化氙化学激光器的设计、试验和诊断方法。全书各章节之间，内容环环相扣，循序渐进，是有关连续波氟化氢和氟化氙化学激光器基本器件方面难得的教科书。

本译著既可作为激光和激光技术专业大学高年级学生和研究生的教材，也可作为工程技术人员、科研工作者以及政府决策机关工作人员的参考书。为方便读者参考，在本译著的最后，增加了一个附录 E，按各章节的顺序给出了原著省略的部分公式推导过程。

本书的翻译工作得到了译者所在单位领导和同事们热情鼓励和大力支持，肖章德同志对原著中的大部分插图进行了重新绘制，李兰博士参与了部分公式的推导工作，蒲东升、张赞、曾翼、郭倩几位同志协助完成了大部分的文字工作，对他们的辛勤劳动致以衷心的感谢。

本书在翻译过程中，尽可能忠实原著，原书中的错漏之处，一经发现和能够确认的，均已做了更正。限于译者水平，错误不当之处难免，恳请读者批评指正。

2009.11.8

---

---

# 前 言

本书简要地叙述了连续波氟化氢和氟化氙化学激光器工作的物理原理，讨论了其燃料组合和选择原则；分析了其气流通道中各组件的工作原理、相关理论和数学模型；讨论了适用于该类激光器的光学元件以及光学材料的相关情况；探讨了氟化氢和氟化氙化学激光器试验台特点和排气系统；分析了与试验相关的检验诊断方法和手段；讨论了氟化氢和氟化氙化学激光器可能的应用领域。本书附录还提供了关于气动通道各组件的设计和计算方法。

本书可作为激光和激光技术专业大学高年级学生和研究生的教材，也可作为工程技术人员和科研工作者的参考书。

依·阿·费德洛夫

1994 年于圣彼得堡

---

---

# 目 录

绪 论 .....	( 1 )
<b>第 1 章 超音速连续波 HF/DF 化学激光器工作原理</b>	
1.1 化学激光器工作机制 .....	( 3 )
1.2 双原子分子振动—转动光谱 .....	( 5 )
1.3 双原子分子振动—转动能级间跃迁 .....	( 6 )
1.4 化学激光器分类 .....	( 8 )
1.5 HF/DF 激光器工作条件 .....	( 10 )
1.6 HF/DF 激光器装置及结构 .....	( 10 )
1.7 化学激光器性能参数 .....	( 16 )
<b>第 2 章 燃料组合及物理化学特性</b>	
2.1 基本的燃料组合及特性 .....	( 18 )
2.2 氧化剂和主燃料的物理化学特性 .....	( 23 )
2.3 燃料组合的选择方法 .....	( 24 )
<b>第 3 章 氟原子发生器燃料组合的快速选择和评估</b>	
3.1 燃料组合最佳配比 .....	( 26 )
3.2 燃料组合性能快速评估方法 .....	( 29 )
<b>第 4 章 气动通道组件的工作过程和原理</b>	
4.1 氟原子发生器 .....	( 35 )

4.1.1	基本要求	(35)
4.1.2	基本结构	(37)
4.1.3	基本参数	(39)
4.1.4	基本原则	(45)
4.2	喷管组件	(46)
4.2.1	基本功能	(46)
4.2.2	四类喷管	(47)
4.2.3	喷管型面设计	(54)
4.2.4	喷管阵列的周期间距选择	(57)
4.2.5	喷管材料的选择	(57)
4.2.6	喷管冷却的影响	(59)
4.2.7	喷管设计建议	(60)
4.3	增益介质	(60)
4.3.1	激射区长度	(60)
4.3.2	比功率影响参数	(62)
4.4	氟原子质量流比功率估算模型	(70)
<b>第 5 章 气动通道工作过程的数学模型</b>		
5.1	氟原子发生器的数学模型和计算方法	(74)
5.2	喷管组件流场计算的数学模型	(77)
5.3	光腔的数学模型及激光器输出特性	(80)
<b>第 6 章 光学元件与光学材料</b>		
6.1	光学谐振腔	(88)
6.2	光束变换及谐振腔相关设计	(91)
6.3	光学元件基底材料	(93)
6.4	气动窗口	(97)
6.5	泛频 HF 输出	(98)
6.6	光学元件及材料建议	(99)

## 第 7 章 连续波 HF/DF 化学激光器试验台特点和排气系统

- 7.1 试验台系统简介 ..... (100)
- 7.2 燃料供给系统 ..... (101)
- 7.3 监测、控制和自动化系统 ..... (102)
- 7.4 试验装置结构 ..... (103)
- 7.5 废气排放系统 ..... (104)
  - 7.5.1 机械泵排气系统 ..... (105)
  - 7.5.2 引射排气系统 ..... (107)
  - 7.5.3 排气洗消一体化系统 ..... (115)
  - 7.5.4 化学泵排气系统 ..... (115)
  - 7.5.5 氟原子发生器废气洗消系统 ..... (117)

## 第 8 章 测量诊断的方法和手段

- 8.1 激光器的能量参数 ..... (120)
  - 8.1.1 输出功率测量 ..... (120)
  - 8.1.2 近场光斑功率密度分布测量 ..... (128)
- 8.2 激光器辐射光谱特性 ..... (129)
  - 8.2.1 光谱测量的重要意义 ..... (129)
  - 8.2.2 红外发射光谱测量仪器 ..... (130)
  - 8.2.3 HF/DF 测量光谱分析与应用 ..... (131)
- 8.3 激光辐射的发散度 ..... (134)
  - 8.3.1 光束发散度定义与影响因素 ..... (134)
  - 8.3.2 光束发散度的测量 ..... (136)
- 8.4 增益介质光学不均匀性 ..... (139)
  - 8.4.1 介质光学不均匀性的评价标准 ..... (139)
  - 8.4.2 介质光学不均匀性的测量 ..... (141)
  - 8.4.3 减小介质光学不均匀性的措施 ..... (145)
- 8.5 增益介质的增益系数 ..... (145)

8.5.1 增益系数的物理意义 ..... (145)

8.5.2 增益系数的测量方法 ..... (147)

8.6 增益介质的气动特性参数 ..... (150)

8.6.1 主要气动特性参数 ..... (150)

8.6.2 气动特性参数的测量 ..... (151)

### 第9章 连续波 HF/DF 化学激光器在各领域的应用

9.1 化学激光器的军事用途 ..... (159)

9.1.1 用激光束摧毁洲际弹道导弹 ..... (160)

9.1.2 用激光束毁伤有生力量和传感装置 ..... (166)

9.2 在科学研究和工程技术中的应用 ..... (168)

9.2.1 激光化学 ..... (168)

9.2.2 化学反应动力学 ..... (170)

9.2.3 激光分离同位素 ..... (170)

9.2.4 连续波 HF/DF 化学激光器增益介质的诊断 ..... (171)

9.2.5 大气层研究 ..... (173)

9.2.6 材料和涂层的光学性质研究 ..... (177)

9.2.7 在医学上的应用 ..... (178)

9.2.8 太空生态学 ..... (179)

9.2.9 对科学研究用连续波 HF/DF 化学激光器特性的评估  
..... (180)

全书结束语 ..... (184)

### 附 录

附录 A 连续波 HF/DF 化学激光器装置气流通道设计和计算步骤示例  
..... (187)

A.1 氟原子发生器喷注器板的设计和计算 ..... (187)

A.2 氟原子发生器燃烧室的设计和计算 ..... (190)

---

A.3	喷管组件的设计和计算	(192)
A.4	光腔气流流动参数的计算	(196)
A.5	光学谐振腔参数的计算和选择	(198)
A.6	超音速扩压器的计算和设计	(200)
A.7	氟原子发生器燃烧室的强度计算	(202)
A.8	气动通道组件的冷却状况计算	(202)
附录 B	用于试验的连续波 HF 化学激光器装置的结构范例	(205)
B.1	YM144-700 型连续波 HF 化学激光器试验装置	(205)
B.2	YM144-500 型连续波 HF 化学激光器试验装置	(207)
B.3	035 型连续波 HF 化学激光器试验装置	(208)
B.4	050 型连续波 HF 化学激光器试验装置	(210)
附录 C	利用“火焰层”模型计算连续波 HF 激光器的功率特性	(212)
附录 D	连续波 HF/DF 化学激光器质量特性评估和计算示例	(219)
附录 E	部分公式推导	(224)
E.1	第 3 章(3.1)式推导	(224)
E.2	第 4 章(4.11)式推导	(225)
E.3	第 5 章公式推导	(226)
E.4	第 7 章图 7.10 中 $x_p$ 表达式推导	(236)
E.5	第 8 章(8.29)式推导	(241)
E.6	附录 A.4 节公式推导	(241)
E.7	附录 C(C.27)~(C.29)式推导	(250)
E.8	附录 D 公式推导	(253)
参考文献		(255)
原参考文献		(264)



---

---

# 绪 论

20世纪50年代中叶,最具标志性的科学发现是找到了基于相干受激辐射原理的电磁波振荡和放大的新方法。采用该方法制造出了波长在无线电和光频段的第一批量子器件,即微波辐射器(MAZER)和激光器(LASER),形成了量子电子学这个独立的发展迅速的物理和工程技术领域。

从那时开始,对第一批样机进行了重大的改进,并且制造出各种新型激光器,其中就有化学激光器。研制化学激光器的基本理念,在于寻找一种能把化学反应释放的能量直接转换为相干辐射能的方法。自1961年最早开始研制化学激光器以来,化学激光器的发展已经历了好几个阶段,其中一个阶段是在1969年完成的,即成功地研制出第一批连续波化学激光器样机。

现在,连续波化学激光器已成为量子电子学的重要研究方向之一。这些激光器工作在一些特殊的波段内,能直接把初始反应的化学能转换成相干辐射能,可以在连续工作模式下获取巨大的功率。连续波化学激光器的所有这些特点,使人们对其产生了浓厚的兴趣。

连续波化学激光器是一种采用流动增益介质工作的气体分子激光器,其激射机制,不仅取决于参与化学反应的初始反应物的内部化学键重建过程,还取决于化学反应释放出来的能量在流动的反应生成物中的非平衡分布。目前,已实现利用多种化学反应生成物,如卤化氢分子、一氧化碳(CO)气体分子、氧气(O<sub>2</sub>)分子和金属氟化物分子等来产生激射。

在最近的15~20年内,利用卤化氢,例如氟化氢(HF)和氟化氘(DF)分子研制的连续波化学激光器已经获得特别迅猛的发展。已经成功研制出了具有高输出功率特性的、无需外部激发能源的高度自给激光器系统,从而确定了这类激光器潜在的广泛应用,以及与实际应用相关的问题,包括燃料组合的选择原则、气流通道组件的计算和设计、增益介质的诊断和检验方法以及寻找和开辟激光器新的应用领域等。

连续波化学激光器是一种综合装置,其学科基础涉及量子电子学、化学反应动力学、气体动力学、光学以及光谱学等。由于各种过程密切相关,所以对在这

类激光器中所发生的综合过程的处理是不同寻常的。在设计和试验该装置或器件时,不能只考虑某一孤立过程而不考虑装置其余部分的结构和工作特点,这样就增加了一定的难度。

在本教材的“高功率装置理论和设计”教学框架内,我们打算对与连续波氟化氢和氟化氘(HF/DF)化学激光器气动组件的计算、设计和试验相关的问题进行简要的和系统的描述。从内容上看,本教材可划分为三个部分:第一部分是第1~6章,主要叙述激光器工作流程的基本原理;第二部分是第7~9章,主要探讨激光器增益介质的试验和诊断问题,以及激光器可能具有的实际应用前景;第三部分是附录,其中包括计算和设计方面的信息。

我们要求学习本教程的学生已经熟悉量子电子学、化学反应动力学、气体动力学和光学的基本原理。

由于本教材的篇幅有限,内容的叙述都十分简要。书中只描述了正确设计激光器所必须掌握的基本原理。为此,在本教材中就没有讲述数学推导过程。

到目前为止,已经有相当多的有关化学激光器的文献发表。这其中既有内容详尽的专著<sup>[1-6]</sup>,也有一般综述性论文<sup>[7-21]</sup>。在编写本教材时,我们广泛使用了俄罗斯“应用化学”科研中心化学气体力学实验室获得的原创性研究成果,并系统整理引用了从现有文献中获得的有关燃烧驱动超音速连续波 HF/DF 化学激光器的最新科研成果。

---

---

# 第 1 章 超音速连续波 HF/DF 化学激光器工作原理

化学激光器在本质上是一种可以把化学能转化成相干辐射能(激光)的能量转换装置。

化学激光器的主要特点:在放热化学反应中形成分子内能的非平衡态分布,形成工作能级间的粒子数反转。现在已知的可以形成激发态分子的泵浦反应有很多。

## 1.1 化学激光器工作机制

分子内能  $E$  等于电子能  $E_E$ , 振动能  $E_V$  和转动能  $E_R$  之和:

$$E = E_E + E_V + E_R \quad (1.1)$$

不同类型能量有几个数量级差别:

$$E_R = (10^{-1} \sim 10^{-3}) E_V \quad (1.2)$$

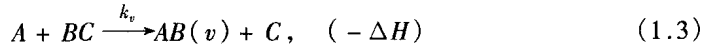
$$E_V = (10^{-1} \sim 10^{-2}) E_E$$

因此,分子中首先被激发的是转动态,其次是振动态,最后是电子态。分子能量是量子化的,即(1.1)式中的每一项仅能够接受特定数值。根据关系式(1.2)可以认为:与分子特定电子态对应的有一系列振动态,而各振动态又有一系列转动态。在电子态、振动态和转动态确定后,与分子电子—振动—转动态对应的能级就确定了。

从理论上讲,化学激光器中的泵浦反应可以激发电子态跃迁、振动—转动态跃迁和纯转动态跃迁。但是,与化学反应放热量相比,由于电子态跃迁所需能量很大,所以在电子态能级间形成粒子数反转是非常困难的;在很多放热化学反应中,转动态间粒子数反转是有可能产生的,但由于转动—平动碰撞弛豫时间很短,所以这种反转也很难实现;而振动态跃迁对应的激发能量中等,激发态分子

完全去激活必须要经过成千上万次分子间的碰撞,非平衡弛豫时间长。因此,是有可能利用振动态之间的粒子数反转原理来制造化学激光器的。

在游离态原子或自由基原子团引发的放热置换反应中,可以产生振动激发态分子:



式中:

A—原子团;

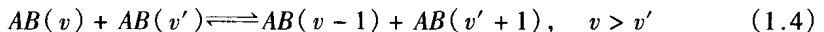
$AB(v)$ —处于振动激发态的双原子分子;

$v$ —振动态量子数;

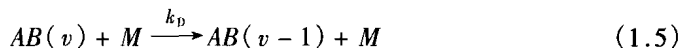
C—单原子或多原子构成的原子团。

为了引发(1.3)式表示的置换反应来产生振动激发态分子,必须在初始的反应混合物中形成一定数量的游离态原子或自由基原子团,而如何在化学激光器工作过程中形成游离态原子或自由基原子团,则确定了该激光器的结构和输出特性。可以利用能导致稳定分子解离的任何物理过程来形成游离态原子或自由基原子团,如闪光光解、电子束引发、气体放电、热解离和化学引发。某种放热化学反应能否作为泵浦反应,主要取决于反应生成焓  $\Delta H$  在产物分子中分配到振动自由度能量的百分比,而该百分比由反应速率常数  $k_p$  决定。

(1.3)式表示的泵浦反应生成焓  $\Delta H$ ,在反应生成物不同自由度之间形成能量非平衡分布,分配给  $AB$  分子振动自由度中的能量百分比是平衡分布时的好几倍,进而形成  $AB$  双原子气体分子的非平衡分布,分配给振动自由度的能量百分比大大超过平动自由度,从而在气体介质中存在大量分子电子基态的振动—转动能级间的粒子数反转,这些气体就是激射所需要的增益介质。随着激发态分子的振动碰撞弛豫(V—V),它们在振动态上趋向平衡分布。



能否利用泵浦反应产生的增益介质来制造化学激光器,以及激光器输出性能的好坏,均取决于振动激发态分子的生成速率(1.3)式和振动—平动(V—T)碰撞弛豫引起的激发态分子的去激活速率(1.5)式。



式中, $M$  是增益介质气体中的原子或分子, $k_D$  为弛豫速率常数。

综上所述,化学激光器的激励机制包括:

(1) 产生引发泵浦反应需要的游离态原子或自由基原子团;

(2) (1.3)~(1.5)式相关过程决定的粒子数反转程度和特性,以及反转粒子数存在的时间。

化学激光器工作机制的方框示意图 1.1 所示。

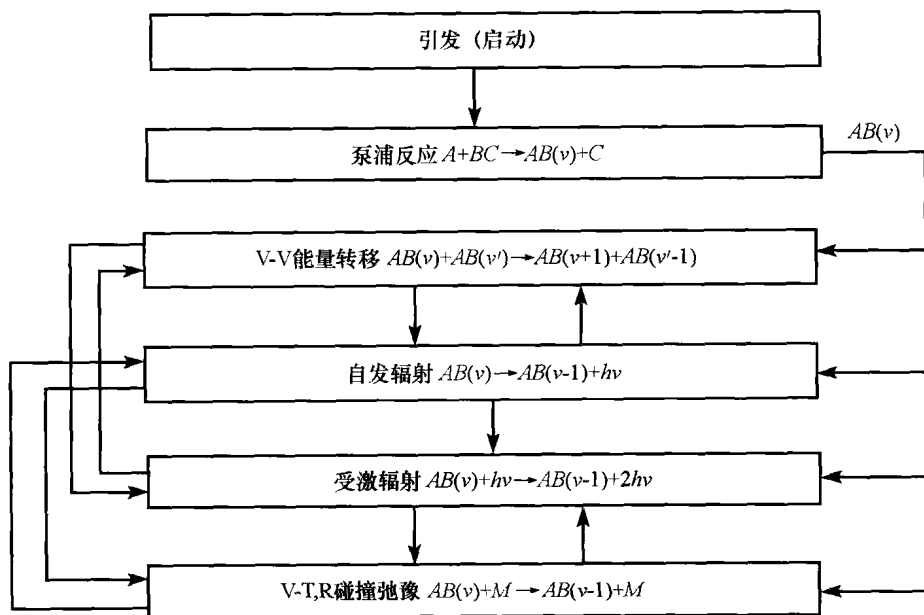


图 1.1 化学激光器工作机制方框图<sup>[16]</sup>

## 1.2 双原子分子振动—转动光谱

现在,我们来探讨双原子分子  $AB(v)$  能级间的跃迁光谱。一个双原子分子,对振动自由度来讲,可近似看作一个线性谐振子,该双原子分子的振动—转动能可由下列表达式计算:

$$E_{v,J} = E_v + F(J) h \cdot c \quad (1.6)$$

式中,  $E_v$  是第  $v$  个能级的振动能。

考虑到激发态分子振动的非谐振性,相关各项表示成:

$$E_v = \omega_e v - \omega_e x_e v(v+1) \quad (1.7)$$

$$F(J) = B_v J(J+1), \quad B_v = B_e - \alpha_e \left(v + \frac{1}{2}\right) \quad (1.8)$$

式中:

$\omega_e, \omega_e x_e, B_e, \alpha_e$ —光谱常数;

$h$ —普朗克常数,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;

$c$ —光速,  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

### 1.3 双原子分子振动—转动能级间跃迁

在平衡情况下,与振动量子数  $v$ ,转动量子数  $J$  能级对应的粒子数密度服从玻耳兹曼(Boltzmann)分布,对应关系式可以写成:

$$n_{v,J} = g_J \frac{N_v}{Q} \exp\left[-\frac{\theta_R}{T} J(J+1)\right] \quad (1.9)$$

式中:

$N_v$ —振动态能级粒子数;

$g_J$ —能级简并度(状态数的统计加权值);

$\theta_R$ —转动特征温度;

$k$ —Boltzmann 常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;

$Q$ —转动配分函数(转动态的统计总和),  $Q = T/(\sigma\theta_R)$ ,  $\sigma$  是对称因子。

$$\theta_R = B_v h \cdot \frac{c}{k}$$

当振动—转动能级间满足粒子数反转条件,即能够满足下列不等式:

$$\Delta n_{v',J'}^{v,J} = n_{v,J} - \frac{g_J}{g_{J'}} n_{v',J'} > 0 \quad (1.10)$$

则  $(v, J) \rightarrow (v', J')$  跃迁对应激光辐射会因存在增益而放大。在振动—转动跃迁情况下,特定谱线辐射能否放大受(1.10)式限制。

利用关系式(1.6)~(1.10),可以分析从能级  $(v+1, J+m)$  到能级  $(v, J)$  的跃迁,与  $\Delta J = m = -2, -1, 0, 1, 2$  对应的跃迁分别称为  $O$  支、 $P$  支、 $Q$  支、 $R$  支、 $S$  支跃迁。根据跃迁选择定则,在偶极辐射情况下,  $\Delta J = 0, \pm 1$ , 对应有三个分支( $P, Q, R$ )。对于大多数双原子分子来说,在电子基态下,还要额外地禁止  $\Delta J = 0$  的跃迁,于是只能看到  $R$  支和  $P$  支,如图 1.2 所示。

跃迁对应能级  $(v, J)$  和  $(v+1, J+m)$  的简并度(统计权重)表达式如下:

$$g_J = 2J+1, \quad g_{J+m} = 2J+1+2m \quad (1.11)$$

根据表达式(1.9)和(1.10),可以得到如下关系式:

$$\frac{N_{v+1}}{N_v} > \exp\left[m(2J+1+m)\frac{\theta_R}{T}\right] \quad (1.12)$$

在  $N_{v+1}/N_v > 1$  的情况下,粒子数全反转,  $P$  支、 $Q$  支和  $R$  支跃迁都可能有增

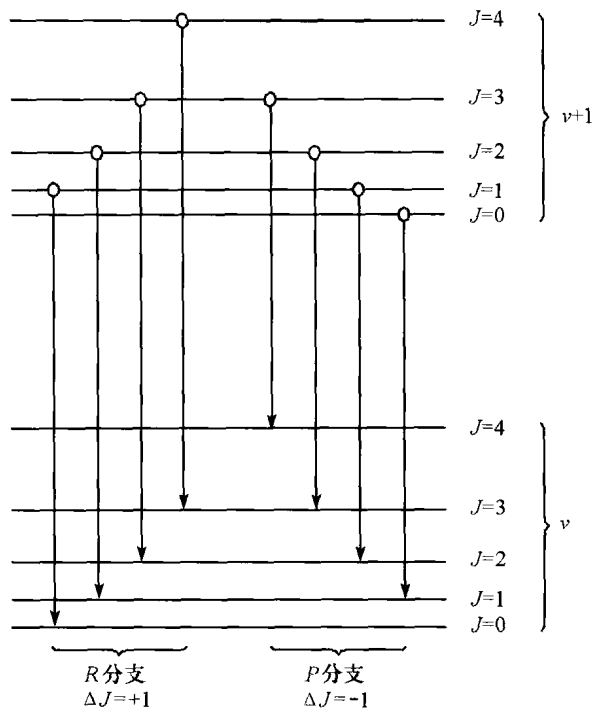


图 1.2 电子基态下的双原子分子振动—转动跃迁能级

益的,但  $R$  支的转动量子数  $J$  应满足  $J < J_{\max}$ , 其中

$$J_{\max} = \frac{1}{2} \frac{T}{\theta_R} \ln \left( \frac{N_{v+1}}{N_v} \right) - 1$$

在  $N_{v+1}/N_v < 1$  的情况下,粒子数部分反转。即该激光跃迁上能级 ( $v+1$ ,  $J+m$ ) 比下能级 ( $v$ ,  $J$ ) 布居粒子数要多,但  $v+1$  振动能级粒子数比  $v$  振动能级的要少。在粒子数部分反转情况下,只是对于  $J > J_{\min}$  的  $P$  支跃迁才可能存在增益,其中

$$J_{\min} = -\frac{1}{2} \frac{T}{\theta_R} \ln \left( \frac{N_{v+1}}{N_v} \right)$$

粒子数全反转主要是在多原子,如三原子分子中出现,而粒子数部分反转则在双原子分子中占主导地位(粒子数部分反转是连续波 HF/DF 化学激光器的典型工作方式)。

如果把振动温度  $T_v$  写成公式:

$$T_v = \theta_v \ln^{-1} \frac{N_v}{N_{v+1}} \quad (1.13)$$

式中,  $\theta_v = (E_{v+1} - E_v)/k$  是振动特征温度, 则  $P$  支跃迁对应的增益条件可表达如下:

$$J > \frac{1}{2} \frac{\theta_v T}{\theta_R T_v} \quad (1.14)$$

条件(1.14)式只限制  $J$  取值的下限,  $J$  值上限取决于转动量子数对应的转动能级粒子数, 而该粒子数应该是足够大的。

限制可能的  $P$  支跃迁  $J$  取值上限的另一个条件是: 上、下工作能级能量应满足  $E_{v+1, J-1} > E_{v, J}$ , 该不等式可等价地表示为  $J < 0.5\theta_v/\theta_R$ 。在  $J$  取值超过 100 的情况下, 不等式不再成立, 但实际上, 粒子数反转程度较大的跃迁对应的转动量子数  $J$  取值较小。

因此,  $P$  支跃迁辐射只有在下列的  $J$  值区间才可能存在增益, 这个区间可写成:

$$\frac{1}{2} \frac{\theta_v}{\theta_R} > J > \frac{1}{2} \frac{\theta_v T}{\theta_R T_v} \quad (1.15)$$

单个振动—转动光谱线的辐射波长可以用下列关系式给出:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} \quad (1.16)$$

式中,  $\Delta E = k\theta_v + k\theta_R [J(J+1) - J'(J'+1)]$ , 这是跃迁上、下能级间的能量之差。

## 1.4 化学激光器分类

化学激光器根据其工作方式(出光时间)不同, 可分为脉冲激光器和连续波激光器。而连续波激光器又可按照激发态分子的泵浦机制不同分为两类: 一类是在化学反应的过程中直接泵浦产生激发态分子的激光器; 另一类是通过化学反应产生的激发态分子近共振传能来间接产生激光工作介质粒子数反转的化学激光器。

根据能量来源的不同, 可以分为能量自给型化学激光器和利用外部能源的化学激光器; 根据增益介质的气流速度大小的不同, 可以分为亚音速化学激光器和超音速化学激光器; 根据激发态分子种类的不同, 可以分为 HF 化学激光器, DF 化学激光器, 氯化氢(HCl)化学激光器, 溴化氢(HBr)化学激光器和一氧化碳(CO)激光器等(如图 1.3 所示)。

到现在为止, 在化学激光器中, 发展最快的是两种类型, 即 HF/DF 激光器和



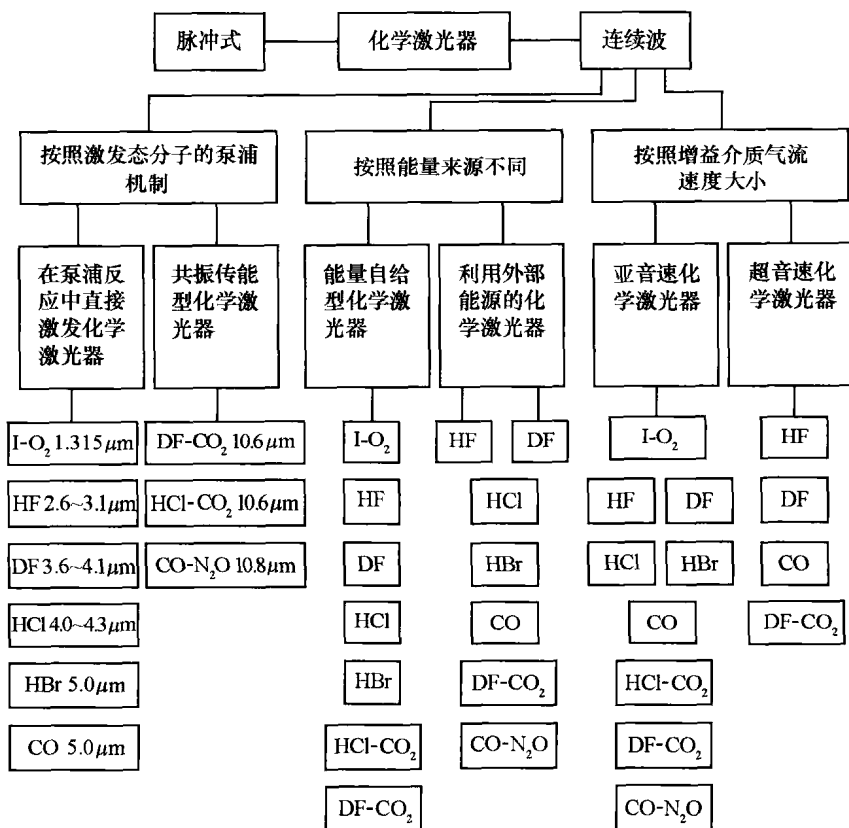


图 1.3 连续波化学激光器典型分类

DF-CO<sub>2</sub> 激光器。这些激光器辐射波长处在红外波段,是通过工作分子(电子基态)的振动—转动跃迁来产生的。在第一种情况下,激射分子是 HF 分子( $\lambda = 2.6 \sim 3.1 \mu\text{m}$ )或 DF 分子( $\lambda = 3.6 \sim 4.1 \mu\text{m}$ )。在第二种情况下,激射分子是不直接参与化学反应的 CO<sub>2</sub> 分子( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ),但它通过与反应生成的激发态 DF ( $\nu$ ) 分子 V—V 近共振传能形成粒子数反转。

化学激光器近年来的重大成就是纯化学氧碘激光器(COIL)研究取得突破性进展,其辐射是在碘原子的电磁偶极子  $S^2P_{3/2} - S^2P_{1/2}$  跃迁( $\lambda = 1.315 \mu\text{m}$ )中实现的。这种激光器的工作机制:通过化学反应产生亚稳态氧分子 O<sub>2</sub>( $a^1\Delta$ ),再通过近共振传能转移到 I( $^2P_{3/2}$ ) 态碘原子,从而泵浦产生 I( $^2P_{1/2}$ )。

此外,尽管众多科研小组作出了很大努力,但到目前为止,仍没有实现通过化学反应直接泵浦产生电子跃迁的激光辐射。本教材仅讨论连续波 HF/DF 化